

散热设计（二）降低 IC 封装热阻的封装设计方法

随着 IC 封装轻薄短小以及发热密度不断提升的趋势，散热问题日益重要，如何降低封装热阻以增进散热效能是封装设计中很重要的技术。由于构造不同，各种封装形式的散热效应及设计方式也不尽相同，本片文中将介绍各种封装形式，包括导线架(Leadframe)形式、球状格子数组形式(BGA)以及覆晶(Flip Chip)形式封装的散热增进设计方式及其影响。

前言

随着电子产品的快速发展，对于功能以及缩小体积的需求越来越大，除了桌上型计算机的速度不断升级，像是笔记型计算机、手机、迷你 CD、掌上型计算机等个人化的产品也成为重要的发展趋势，相对的产品所使用的 IC 功能也越来越强、运算速度越来越快、体积却越来越小，如<图 1>所示。整个演进的趋势正以惊人的速度推进，而对这种趋势能造成阻碍的一个主要因素就是「热」。热生成的主要因素是由于 IC 中百万个晶体管计算时所产生的功率消耗，这些热虽然可藉由提升 IC 制程能力来降低电压等方式来减少，但是仍然不能解决发热密度增加的趋势，以 CPU 为例，如<图 2>所示，发热瓦数正逐年增加。散热问题如不解决，会使 IC 因过热而影响到产品的可靠性，造成寿命减低甚至损毁的结果。

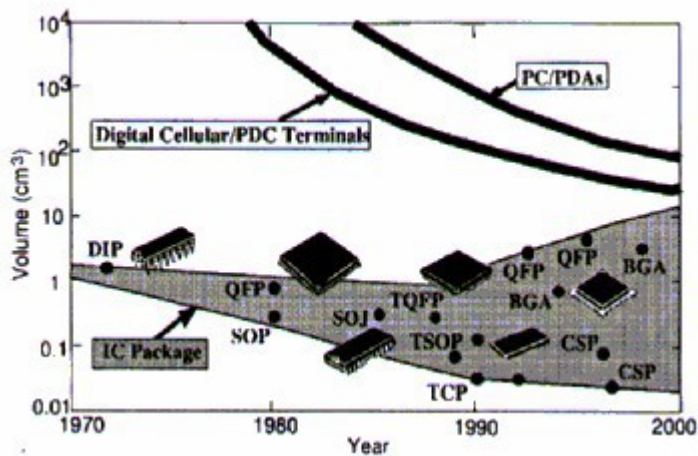


图 1 电子产品及 IC 尺寸演进

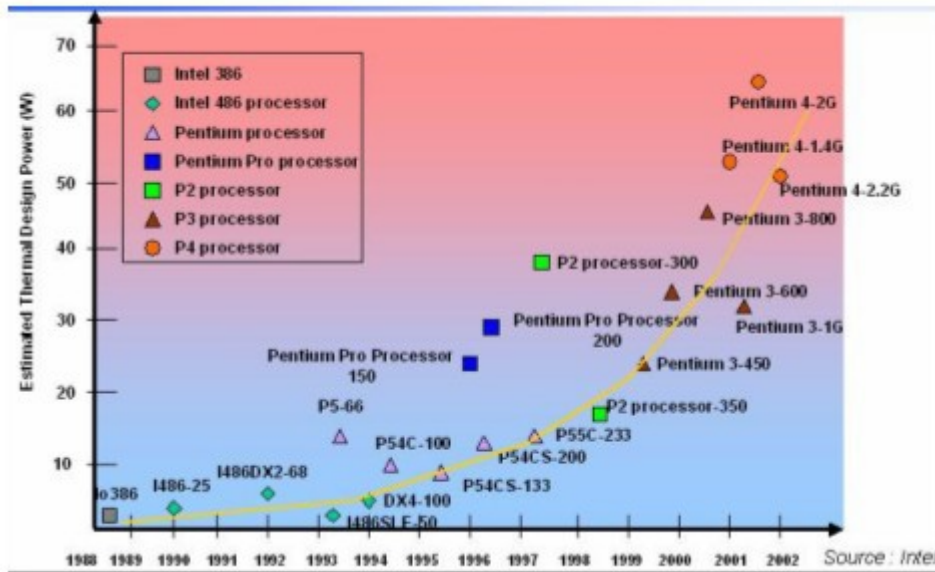


图 2 Intel CPU 发热功率趋势

封装发展的趋势从早期 PCB 穿孔的安装方式到目前以表面黏着的型式，PCB 上可以安装更多更密的 IC，使得组装的密度增高，散热的问题也更为严重。针对于 IC 封装层级的散热问题，最基本的方式就是从组件本身的构造来做散热增强的设计。而采用多层板的设计等方式，对 PCB 层级的散热也有明显的帮助，而当发热密度更大时，则需要进一步的系统层级的散热设计如散热片或风扇的安装等，才能解决散热问题。就成本的角度来看，各层级所需的费用是递增的，因此 IC 封装层级的散热问题就特别重要了。

IC 封装的型式很多，如<图 1>所示，包括了以导线脚或是以锡球连接于印刷电路板上的方式，以导线脚连接的方式像是 TSOP、QFP、LCC 等封装，是由金属导线架支撑封装结构，借着两面或四边的接脚和 PCB 连接。而以球状格子数组形式如 BGA 的封装方式，是藉由封装下方的锡球将和 PCB 连接。以覆晶方式的封装则是由锡球及底层填充材料（underfill）将芯片以裸晶的方式安装于基板(substrate)(如 Flip Chip BGA (FCBGA)封装)或直接承载于 PCB 上(称为 Flip-Chip on board (FCOB) 或 Direct Chip Attach (DCA))。

IC 封装热传基本特性

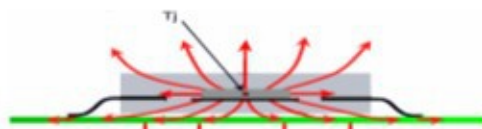
评估 IC 封装之散热性能可以下式表示之[1,2]:

$$R_{JA} = \frac{T_J - T_A}{P_d} \quad (1)$$

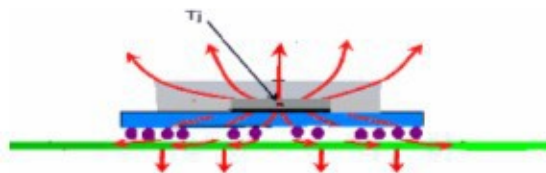
其中 R_{JA} 称为由芯片接点到环境之热阻， T_J 为接点温度， T_A 为环境温度， P_d 为消耗电力。上述 R_{JA} 之定义代表芯片的散热性能，较低的值表示较好的散热效果。由于接点温度无法直接得到，因此热阻值需藉由量测方法以及数值模拟来获得，量测的方法及装置目前有 JEDEC 及 SEMI 两种标准【3,4】，对于封装的尺寸、板的设计、实验的方式及摆设都有规范，一般实验时使用的并非真实的芯片而是尺寸相同的热芯片，利用芯片中温度感应器的电压及温度关系来仿真实际芯片运作的温度变化。完整的数值模拟则是利用 3D 的计算流体力学软件，来仿真芯片的实际温度变化

情形【5】。由于热阻值和环境有关，在使用时需注意和实际情况的差异【6,7】。

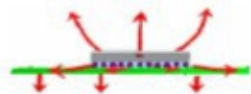
IC 的散热主要有两个方向，一个是由封装上表面传到空气中，另一个则是由 IC 向下传到 PCB 板上，再由板传到空气中。当 IC 以自然对流方式传热时，向上传的部分很小，而向下传到板子则占了大部分，以导线脚或是以球连接于板上的方式，其详细的散热模式不尽相同。以导线脚型式的封装为例，向下传的热又可分成两部分，一部分是经由导线架及接脚传到 PCB，另一部份则是由芯片经由模塑材料及下方空隙的空气传到 PCB 中，如<图 3 (a)>所示。而 BGA 的散热方式则是藉由基板 (substrate) 及锡球 (solder ball) 将热传到 PCB 中，如<图 3 (b)>所示，覆晶直接承载则是经由下方锡球及底层填充材料将热传到 PCB 中，如<图 3 (c)>所示。由分析可知在自然对流时，QFP、BGA 以及 FCOB 热传向下方 PCB 的比例分别为 85%，88%以及 95%。由此可知，当自然对流时，芯片的热大部分会传到板上，设法使热更容易向下传到板上，是一个散热设计原则，因此像是在 QFP 中的导线架，以及 BGA 中的基板及锡球，都和散热设计有很大关系。强制对流时，虽然大部分的热会转而由封装上方传出，降低散热路径的热阻值对于散热仍有很大的帮助。覆晶由于原本就很容易将热传到板上，因此就封装本身的改善空间有限，需由外加散热装置等方式来作改善。



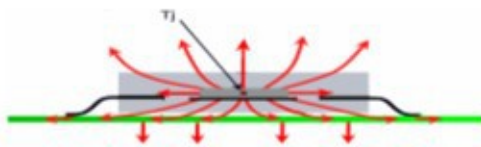
(a) · 導線架之型式封装



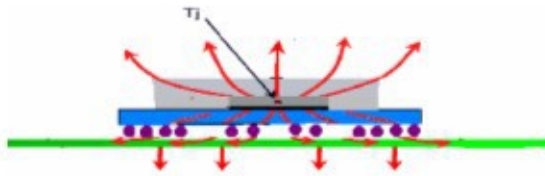
(b) · BGA 之封装型式



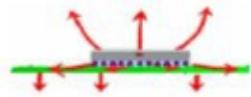
(c) · 覆晶直接承载的封装型



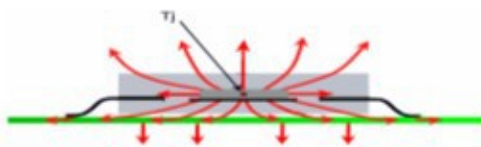
(a) · 導線架之型式封裝



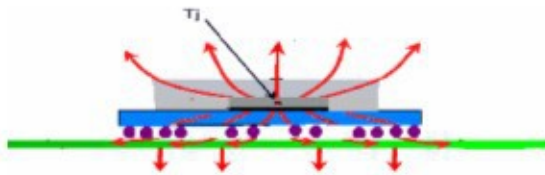
(b) · BGA 之封裝型式



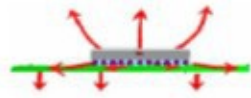
(c) · 覆晶直接承載的封裝型



(a) · 導線架之型式封裝



(b) · BGA 之封裝型式



(c) · 覆晶直接承載的封裝型

图3 各种封装型式的散热路径

由前面的分析可知，由于导线架形式的封装部分的热需藉由接脚散去，散热路径较长，因此比起热可直接往下方经由基板传出的球状格子数组封装的形式散热要差，而覆晶形式的封装由于热较可直接由芯片传到 PCB 上，因此散热效果会最好。以相同封装面积 (foot area) $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 而言，QFP, BGA 及 Flip chip 的热阻值分别为 $50^\circ\text{C}/\text{W}$, $36^\circ\text{C}/\text{W}$ 及 $20^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

散热性能增强之讨论【8,9】

封装热阻的改善手段主要可透过结构设计、材料性质改变以及外加散热增进装置三种方式。以下将分别就三种封装形式的散热设计作详细讨论。

1. 导线架型式之封装

使用导线架的封装型式如 TSOP、QFP、PLCC 等封装，虽然脚数及外型不同，但是结构上是类似的，因而散热改善的方式也有共通性，以下讨论组件各种散热改善方式及效果。

对于 QFP 而言，一般可用脚数或封装尺寸表示，如 100PQFP(100 pin) 或是 10×10PQFP(10mm×10mm size)，可用以下的方式增进散热能力：

(1) 采用高热传导系数的模塑复合材料。

传统的模塑复合材料的热传导性约为 0.6~0.7W/m·°C，可使用传导性高的模塑复合材料使传到导线的热量增加，而使热阻值降低。若 100 PQFP 采用 $K=3.0 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ 的材料，而言，约可降低 14.5°C/W，而 64PQFP 则可降低约 15°C/W。

(2) 使用热传导性高之导线架。

使用导热性高的铜合金来取代铁合金 Alloy-42，将可使导热性质改善，此两种材料和模塑复合材料传导性对散热的关系，如<图 4>所示。

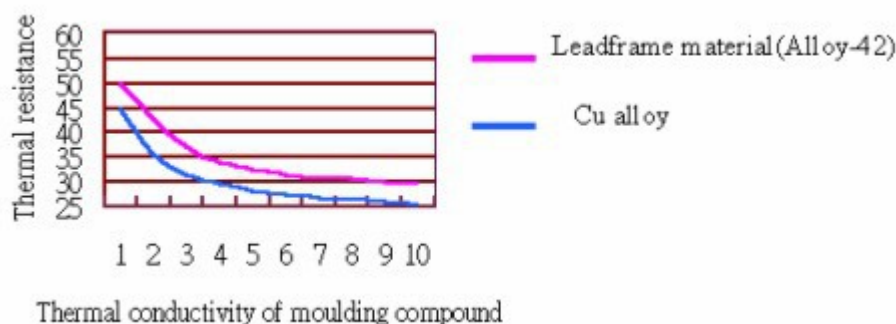


图 4 模塑材料及导线架材料传导性对热阻之影响

(3) 减少导线及支撑垫的间隙。

这是花费最少的热性能增强方式，减少导线及支撑垫之间的距离，可使经前述之散热路径散去之热增加，对于 14×20 之 PQFP，热阻约可降低 10°C/W。

(4) 降低 IC 到 PCB 的间距。

将 IC 到板之间的间距降低，可降低空气间隙的热阻，模拟显示，若将 IC 之高度由 150 降至 50μm，对 10×10 的 PQFP 而言，RJA 将降低约 5°C/W，而对 28×28mm 的 PQFP 而言，当距离由 240 降至 100μm 时，热阻可降低 4°C/W。

(5) 熔接的导线。

所谓熔接的导线是指导线直接接在芯片垫上，此种方式有助于热传，使得热可直接经由导线传到板上。对于 64PQFP 而言，RJA 约可降低 $17^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，对 208PQFP 而言，也约可降低 $9^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，此种方式的缺点是必须避免导线架热胀冷缩的问题，同时为了和模塑复合材料接合，也需有特殊之设计。

(6) 加装散热片

最有效率的散热方式是在 IC 中安装散热片，其中一种安装方式是装入一个厚的散热片，一面暴露在空气中，这种 QFP 又称为 HQFP(Heat-spreader enhanced Quad Flat Pack)【5】，另外一种方式则是在 IC 中装入一片薄的散热片。加装散热片的目的是增加热传量，因此适当之形状是很重要的，各种散热片的型式如<图 5>所示，一般而言，散热片设计之准则为增加面积要比增加厚度来得重要，而面积越大，厚度越厚且露于封装表面和空气直接接触的散热片效果越好，各种散热片的效果如<图 6>所示。

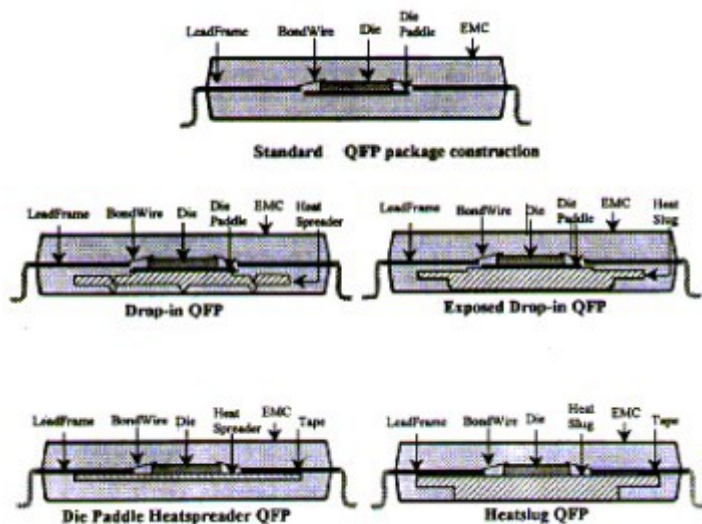


图 5 各种散热片安装方式

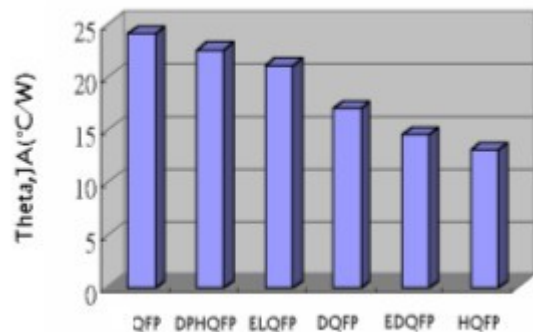


图 6 各种散热片安装方式的散热效果

以下将讨论两种比较特殊的导线接脚型式的散热效果：

<图 7>所示之 LOC (Lead On Chip) 型式主要用于 TSOP 或 SOJ 等两面接脚的封装型式，将导线架延伸至芯片上方，再以双面胶等黏着材料和芯片连接，好处是打线距离减少，对电性帮助较大，采用此种方式的封装方式，对 TSOP 40 而言热阻约可减少 $14^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。QLP (Quad Leadless Package) 型式是将 QFP 伸出的接脚除去，由于体积减少，因此可归纳为 CSP 型式，如<图 8>所示，比较 $7\times 7\text{mm}$ QFP 及 $7\times 7\text{mm}$ QLP，热阻值约可降低 $25^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

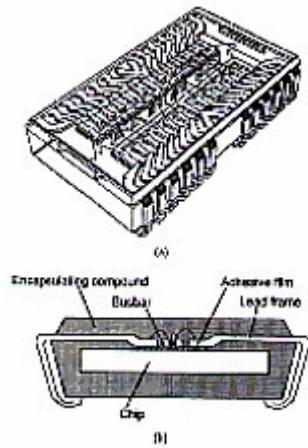


图 7 LOC 的封装型式

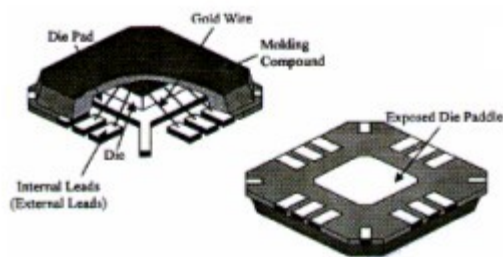
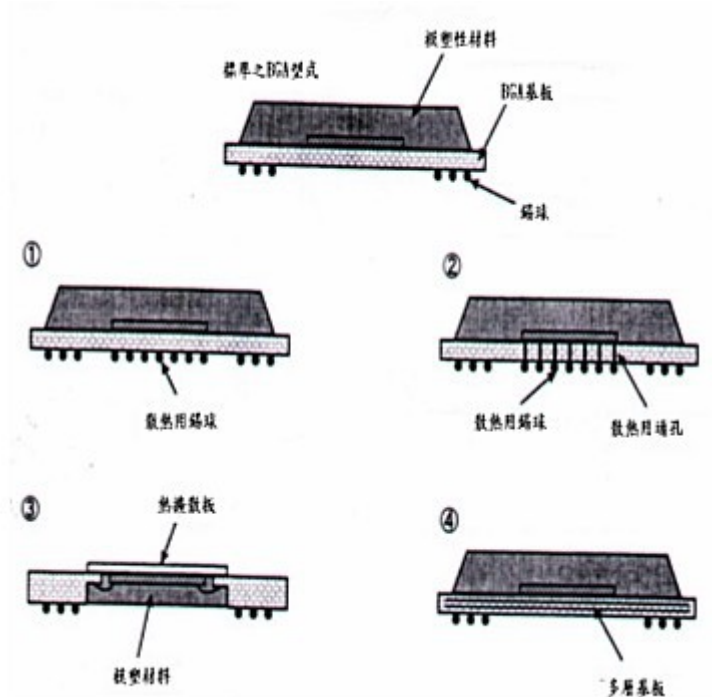


图 8 QLP 的封装型式

3. BGA 之封装阶层热传改善之讨论【8,9】

BGA 组件的散热改善方式有如<图 9>所示的几种方法，说明如下：



(1) 使用散热锡球 (thermal ball) 及散热通道 (thermal via) 协助散热
 增加 BGA 散热的最好方式是使用散热用锡球，散热用锡球是指直接安装在芯片正下方基板下的锡球，可以借着锡球直接将热传到 PCB 上，而减少空气造成的热阻。一般为了使散热到球更迅速，可用散热通道穿透基板。实验量测显示，对于 27mm BGA 而言，热阻约可降 $7^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，如 <图 10>、<图 11> 所示。

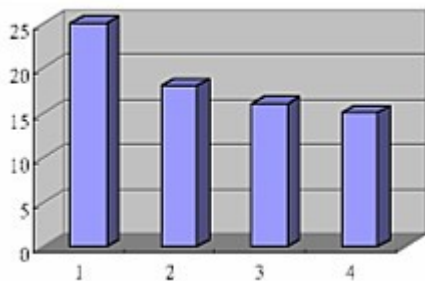


图 10 不同球数目、基板层数和热阻值的关系，
 (1) 352lead, 2层板 (2) 388lead, 2层板, (3) 352lead, 4层板, (4) 388lead, 4层板

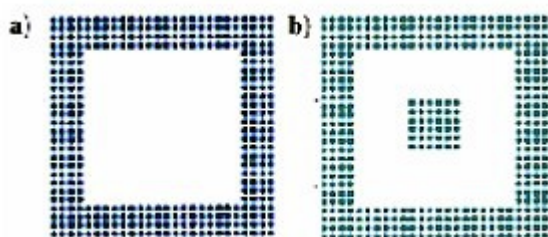


图 11 球数目 (a) 352 及 (b) 388 之分布关系

(2) 接面向下 (cavity down) 之 BGA 封装形式

在接合面向下 (Cavity down) 形式的 BGA 可以加装散热片以帮助散热, 而主要的散热路径为 IC > 散热片 > (基板 >) 锡球 > 板, 使用此种方式的散热, 热阻将可减少 $14^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。此外, 由于封装表面可直接放置散热片(heat sink), 因此热阻更容易降低。

(3) 采用多层的基板

就如同 PCB 一样, 可藉由增加铜含量来减少基板的扩散热阻, 也就是所谓的多层 BGA, 27mm 的多层 BGA 比起两层的 BGA, 其热阻约可降低 $5^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 35mm 的多层 BGA 比起两层的 BGA, 其热阻约可降低 $7^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

(4) 嵌入式的散热片 (Metal slug)

和前述倒线架形式封装的散热片安装方式类似, 嵌入方式的散热片则可用于接合面向上 (cavity up) 形式的装置, 将芯片直接安装在嵌入的散热片上, 再藉由锡球装置于板上, 热阻也约可有 $14^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 的改善。

3. 覆晶直接承载 IC 热传改善之讨论【10】

对于 FCOB 而言, 由于组件传到 PCB 的热阻只占组件传到空气部分的 5% 以下, 因此除非加装热扩散片, 或从板阶层考虑, 否则对散热的改善有限, 以下分析各种组件本身的散热改善方式:

(1) 增加散热用球的影响

对于 $8\times 8\text{mm}$ 的型式而言, 下方长满球和只有周围长球的型式相比, 约减少 $3.4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

(2) 采用高热传导系数的 underfill 材料。

对于 $8\times 8\text{mm}$ 形式而言, underfill 材料的散热特性对于散热而言影响不大, 就高传导性的材料而言, (传导性 $2.5\text{W}/\text{mK}$) 其热阻值比起一般的材料 (热阻值 $0.5\text{W}/\text{mK}$) 只增加约 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

(3) 加装热扩散片

最有效率的散热方式是在覆晶外安装热扩散片, 以增加散热面积, 并增加热传量。对于 $12\times 12\text{mm}$ 的型式而言, 加装 $50\times 50\times 3\text{mm}$ 的散热片, 热阻可由 $21.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 减少至 $11^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

结论

本文中详细介绍各种封装形式的散热改善方式及效果, 由文中可知, 各种封装形式由于构造不同, 因此散热增强的方法及效果不同。散热改善的方式, 大致包括了结构、材料及散热增进装置 (如散热片) 的安装。结构的改善对于导线接脚及锡球连接型式的封装散热有显著的影响, 但是需注意制程的难易及对其他像是电性及可靠度等的影响。材料改善的效果则不同, 像是导线架材料及 BGA 基板的改善对封装的散热效果就很显著, 而模塑材料或底部填充材料的改善则对覆晶形式封装的影响有限。加装散热片一般都会有不错的效果, 但是成本、制程及可靠度也是需同时考虑的。要改善 IC 本身的散热以及降低封装的热阻值, 必须针对不同的封装形式来设计最符合成本及功能的散热方式。